

## Inversores de frequência

### Introdução

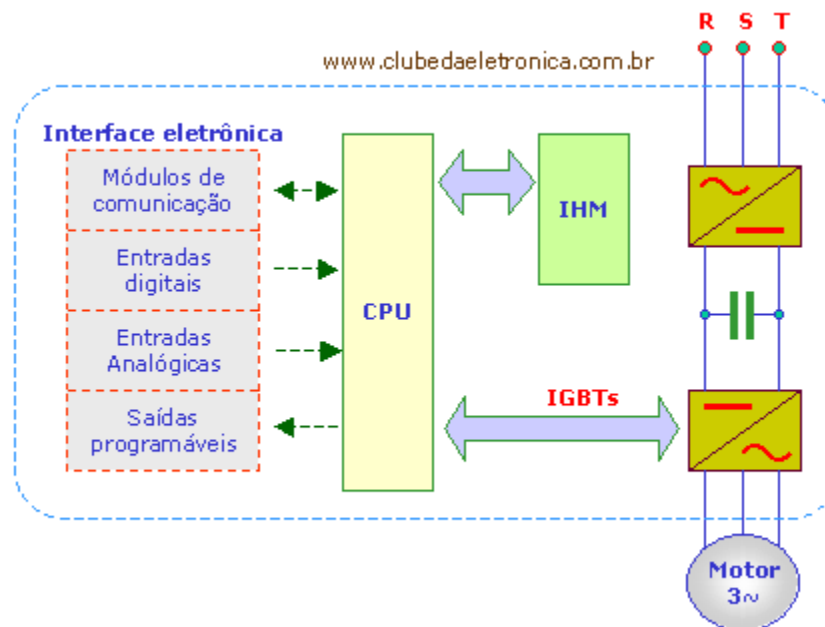
Desde que os primeiros motores surgiram, os projetistas perceberam uma necessidade básica, controlar sua velocidade, várias técnicas foram utilizadas ao longo dos anos e tiveram seu tempo de glória, com o aperfeiçoamento da eletrônica de potência, e a fácil integração com outros dispositivos, criou-se o inversor de frequência, um dispositivo eletrônico, que é de fundamental importância na indústria.

### Idéia básica de funcionamento

O sinal AC da rede é convertido em DC, e este novamente em AC, porém, agora pulsado e com largura modulada, assim podemos ajustar sua frequência e sua tensão e com isso controlar sua velocidade e seu torque.

### Blocos básicos de um inversor

Hoje, existem vários inversores de frequência disponíveis, obviamente, possuem diferenças de um fabricante para outro, seja para agregar valor, ou para reduzir custos. Porém, sua estrutura básica é comum para a maioria dos fabricantes. Vejamos:



### Descrição dos blocos

**Unidade Central de Processamento (CPU)** ⇒ Tem como base de processamento um microcontrolador ou ainda um microprocessador, porém, este último necessita de memórias agregadas. Pode ser considerado o cérebro do inversor de frequência, pois é neste bloco que todas as os dados do sistema e parâmetros ficam armazenados. A CPU também é responsável pela geração da lógica de pulsos para os transistores.

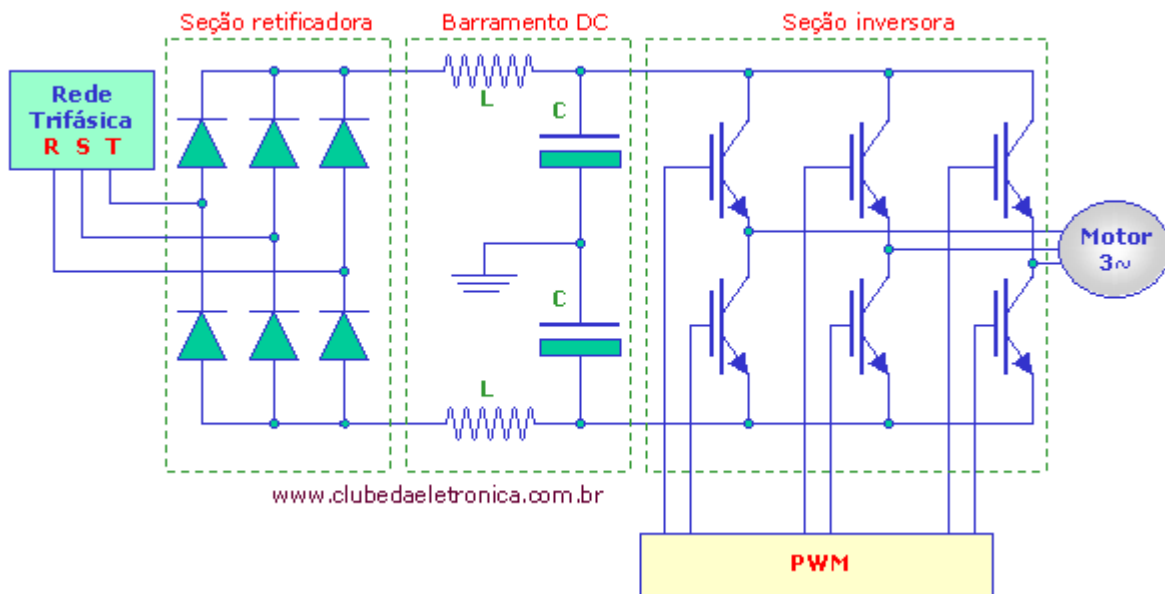
**Interface Homem Máquina (IHM)** ⇒ É o bloco de interação entre o usuário e máquina, é neste bloco que ocorre a parametrização, ou seja, é através deste bloco que as informações como, frequência e torque são inseridas no inversor, além de permitir a visualização do que esta ocorrendo.

**Interface eletrônica** ⇒ Permite a comunicação com dispositivos externos. Neste bloco, poderá existir: módulos de redes de comunicação, entradas para sinais analógicos de 0 a 10V ou 4 a 20mA, entradas digitais, saídas programáveis etc.

**Etapa de potência** ⇒ É constituída pelo retificador trifásico de potência, que através do barramento DC, alimenta um módulo com seis transistores IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Esta etapa é comum a todos os inversores, assim, detalharemos um pouco melhor.

### Arquitetura básica da etapa de potência

A arquitetura de um inversor de frequência (etapa de potência) é basicamente composta por uma etapa retificadora, uma etapa de filtragem e uma etapa de chaveamento.



### Descrição/ ilustração das etapas

**Seção Retificadora** ⇒ Consiste em uma ponte retificadora trifásica onde, seis diodos retificam a tensão trifásica da rede R S T proporcionando uma saída contínua, porém, com uma certa ondulação ou “ripple” que será minimizado pelo barramento DC.

A tensão de pico na carga, desconsiderando as quedas nos diodos, pode ser calculada por:

$$V_P \text{ carga} = \sqrt{2} \cdot V_{rms}$$

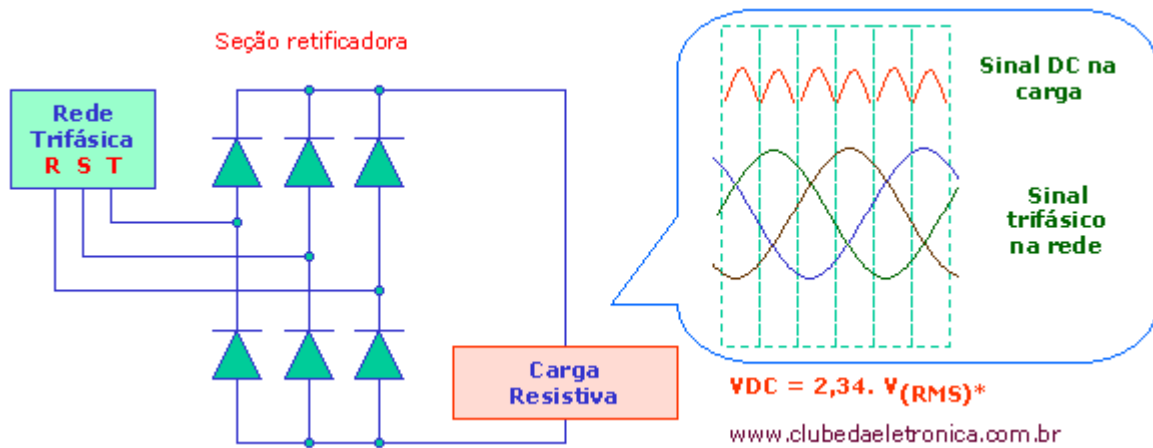
A tensão DC ou tensão média na saída do retificador pode ser calculada pela seguinte expressão.

$$V_{DC} = 2,34 \cdot V(rms)$$

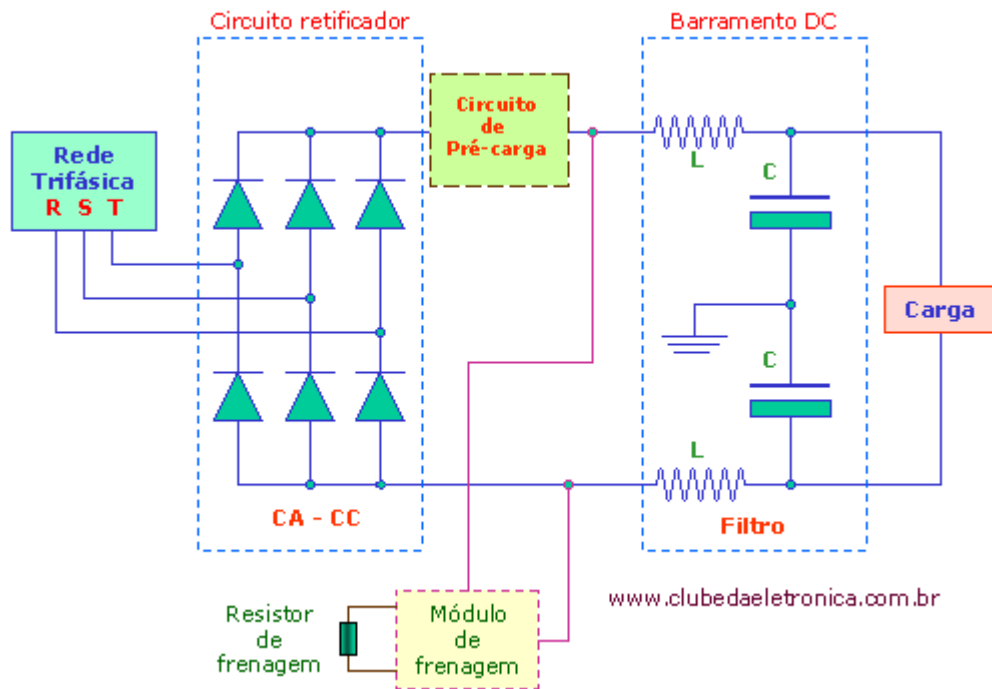
Onde:

- $V_{rms}$  é a tensão de fase da alimentação, ou seja, medida entre fase e neutro.
- A dedução do número 2,34 não faz parte do escopo deste material, mas pode ser consultada no seguinte link: <http://www.dee.feis.unesp.br/gradua/elepot/cap2/fr15.html>

A figura seguinte ilustra uma ponte retificadora trifásica, com carga puramente resistiva e seu sinal de saída.



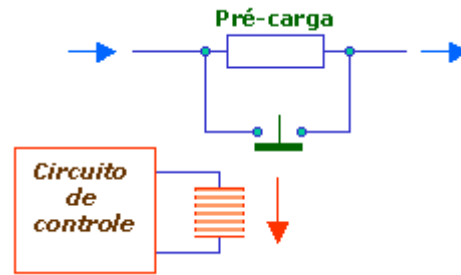
**Barramento DC** ⇒ Pós-retificado a tensão DC resultante é filtrada, a fim de ser finalmente utilizada pela seção inversora. Nesta etapa, adicionaremos alguns módulos extras que merecem atenção:



**Módulo de pré-carga:**

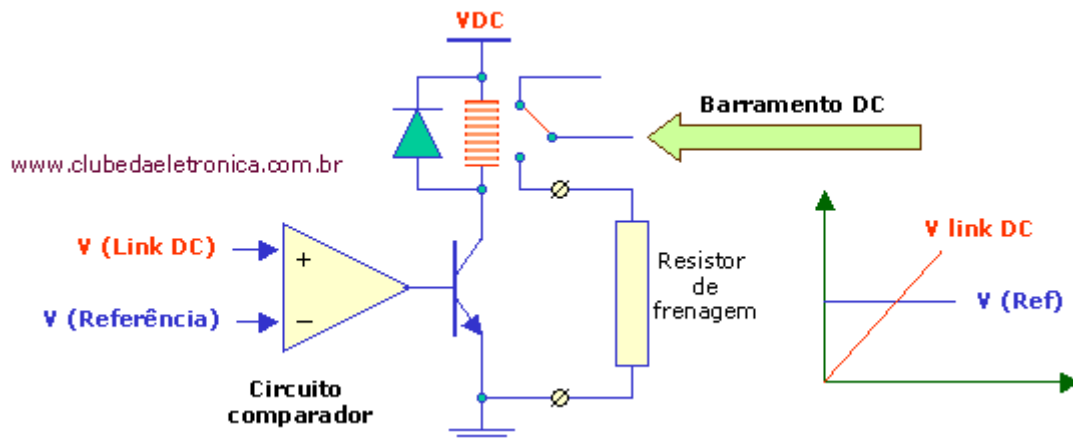
Ao energizar o inversor de frequência uma tensão relativamente alta será entregue ao filtro, que estará inicialmente descarregado, o que acarretará um alto pico de corrente que poderá causar danos ao inversor, uma maneira simples de controlar esta corrente é utilizando um circuito de pré-carga, que pode ser desde um simples resistor a um circuito mais complexo.

A figura ao lado ilustra um circuito de pré-carga, onde um controle acionará uma bobina que abrirá seu contato NF obrigando a corrente fluir através do resistor de pré-carga. Quando o circuito estiver em regime permanente, o circuito de controle interrompe a corrente da bobina, fechando seu contato que será o novo caminho para a corrente elétrica.



### Módulo de frenagem

O módulo de frenagem, tem como objetivo remover a energia armazenada por cargas regenerativas, quando estas são desaceleradas. Sendo mais genérico, toda a carga que requer parada rápida pode ser considerada uma carga regenerativa, ou seja, devolve a energia para a fonte. Abaixo, uma ilustração do módulo de frenagem.



Seu funcionamento é simples, um comparador compara a tensão de referência pré-ajustada com uma tensão do barramento DC, se esta for maior o comparador envia um sinal que satura o transistor energizando o relé, que desvia a corrente para o aterramento, através de um banco de resistores que dissiparão essa energia em forma de calor.

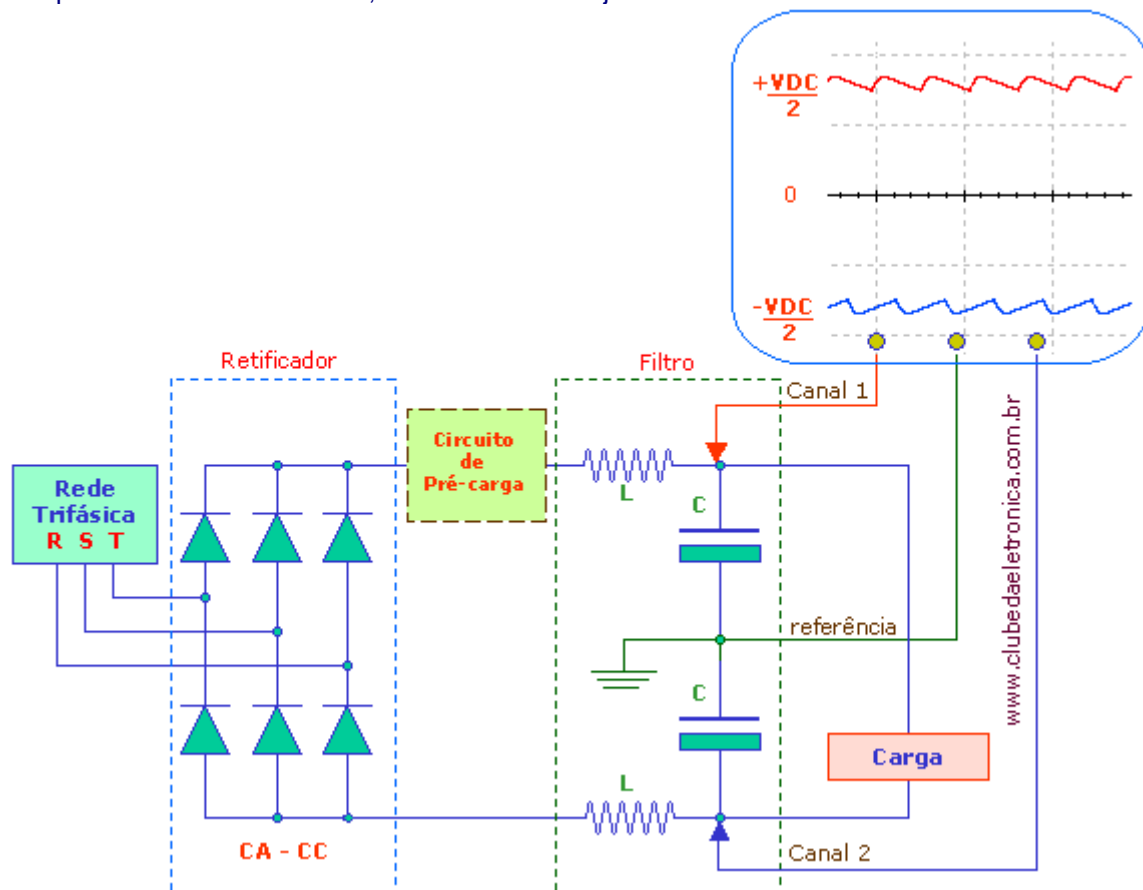
Nota: Caso o usuário não conecte estes resistores e sua carga requerer uma parada rápida, excesso de energia retorna ao barramento DC, que acionará um alarme e desligará o inversor ou em situações mais severas, queimar o inversor.

### Os filtros do barramento DC:

O conjunto de filtros no barramento DC ou LINK DC, tem o objetivo de suavizar ondulações geradas pelo circuito retificador. Os capacitores minimizam as ondulações da tensão, enquanto que indutores minimizam as ondulações da corrente, vale lembrar que o sinal, ainda carregará consigo uma pequena ondulação.

### A derivação central nos capacitores

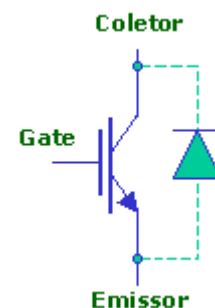
Uma forma eficaz de conseguir a simetria de um sinal DC é utilizando um “center TAP” no banco de capacitores e obtendo assim, +VDC e -VDC. Vejamos:



Observando a ilustração, fica fácil perceber que a tensão na carga será total, porém, a tensão nos capacitores será dividida em duas partes  $+VDC/2$  e  $-VDC/2$ .

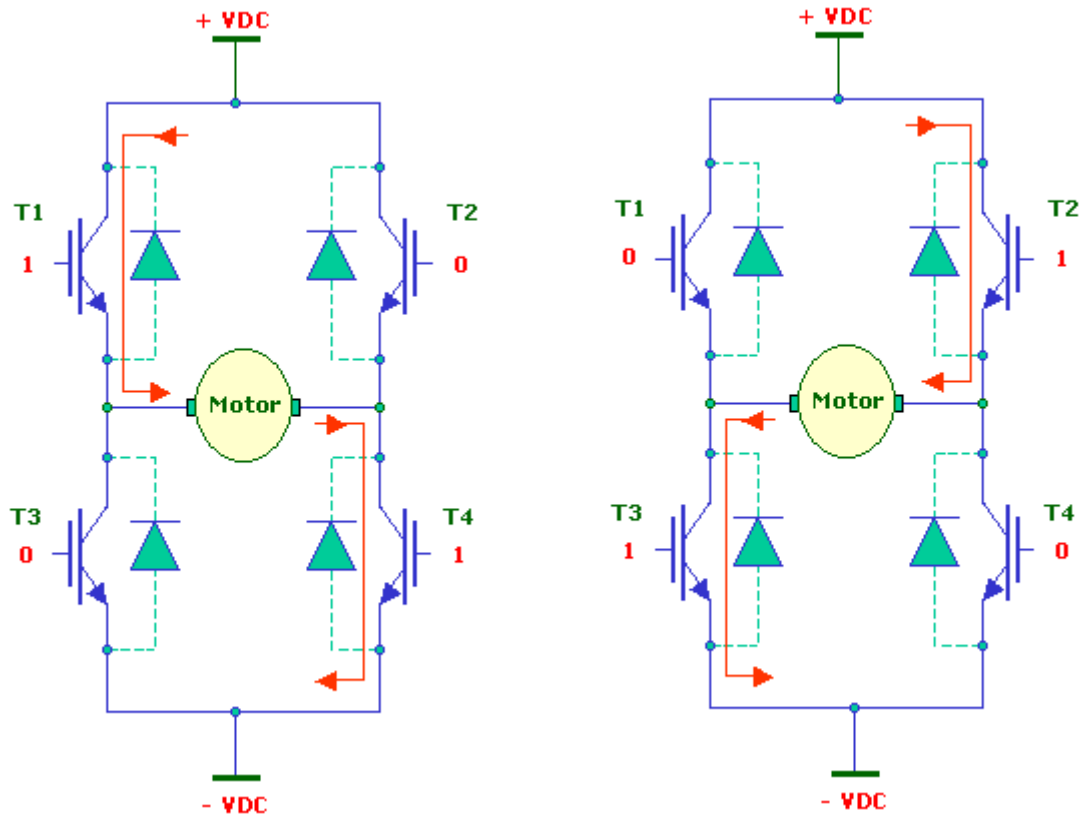
**A seção inversora**  $\Rightarrow$  Uma vez retificado e filtrado o sinal deverá ser novamente convertido em alternado, esta função é atribuída a um conjunto de IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) que operam em corte (chave aberta) e saturação (chave fechada) obedecendo uma lógica previamente estabelecida.

Em aplicações com cargas indutivas, que é o caso do inversor de frequência, podem aparecer tensões inversas elevadas contra as quais o IGBT deve ser protegido. Essa proteção é feita com o uso de diodos ligados em paralelo com o coletor e o emissor para evitar que uma elevada tensão reversa seja aplicada ao IGBT.



### Um inversor monofásico básico:

A melhor maneira de explicar a inversão é fazendo uma analogia com um circuito monofásico. O circuito abaixo pode gerar uma tensão monofásica alternada, a partir de uma alimentação DC.

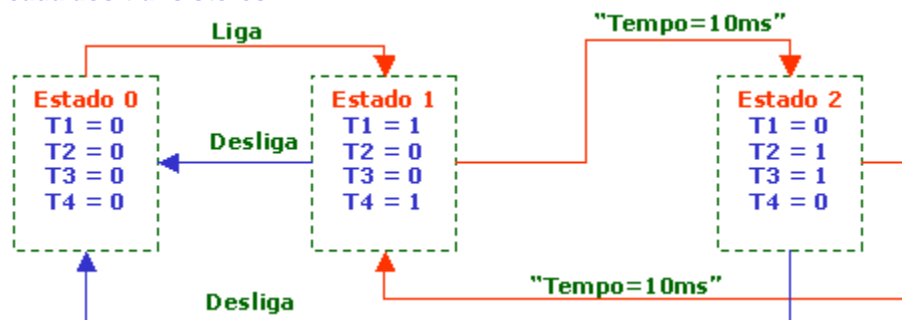


Este circuito é conhecido como Ponte H, seu funcionamento é simples:

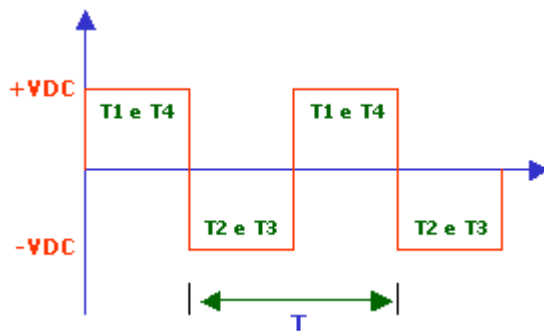
- Se 1, o transistor entra em saturação (chave fechada).
- Se 0, o transistor entra em corte (chave aberta).

A lógica aplicada aos transistores inverterá o sentido da corrente no motor, e invertendo o sentido da corrente, o sinal passará a ser novamente alternado. Caso aumentarmos a frequência de desses transistores, também aumentaremos a velocidade de rotação do motor, e vice-versa.

### Lógica aplicada aos transistores



Como os transistores operam como chaves (corte ou saturação), a forma de onda da tensão de saída do inversor de frequência é sempre quadrada, porém, os pulsos variam de acordo com a seqüência imposta. Vejamos:

**Sinal na carga**

Nesta seqüência, dois estados, mais o estado desligado foram incluídos, assim, podemos obter o seguinte sinal na carga:

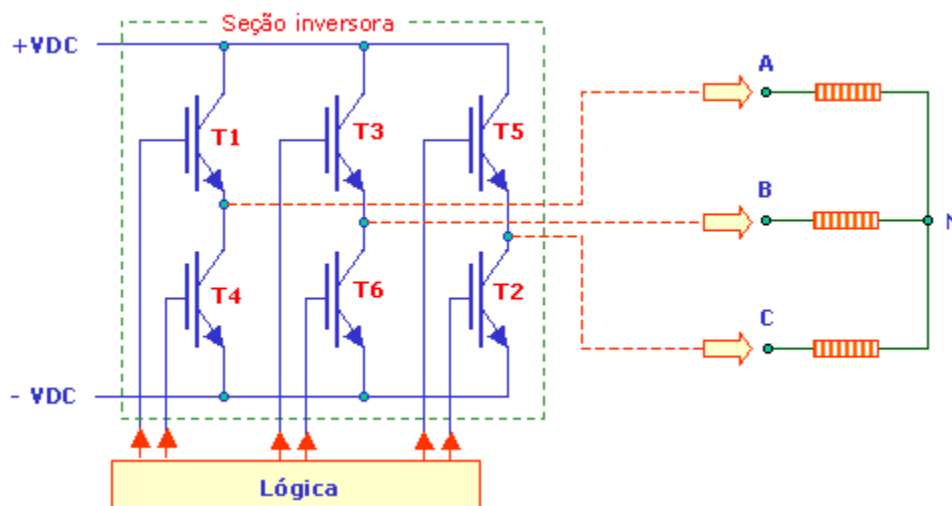
A frequência é o inverso do período, então teremos:

10ms de sinal positivo e 10ms de sinal negativo, totalizando um período de 20ms e, portanto, uma frequência de 50Hz.

Assim, se o período de transição for reduzido a frequência aumentará e se for aumentado a frequência diminuirá.

**O chaveamento trifásico**

Nas aplicações industriais, os motores são trifásicos, com defasagem de  $120^\circ$  entre fases, para o sinal de saída seja fiel ao original, ele também deverá ser trifásico. Para que a saída seja o mais próximo possível de um sinal senoidal, a lógica de controle precisa distribuir os pulsos de disparos pelos 6 IGBT's, de forma que cada transistor conduza por  $120^\circ$ .

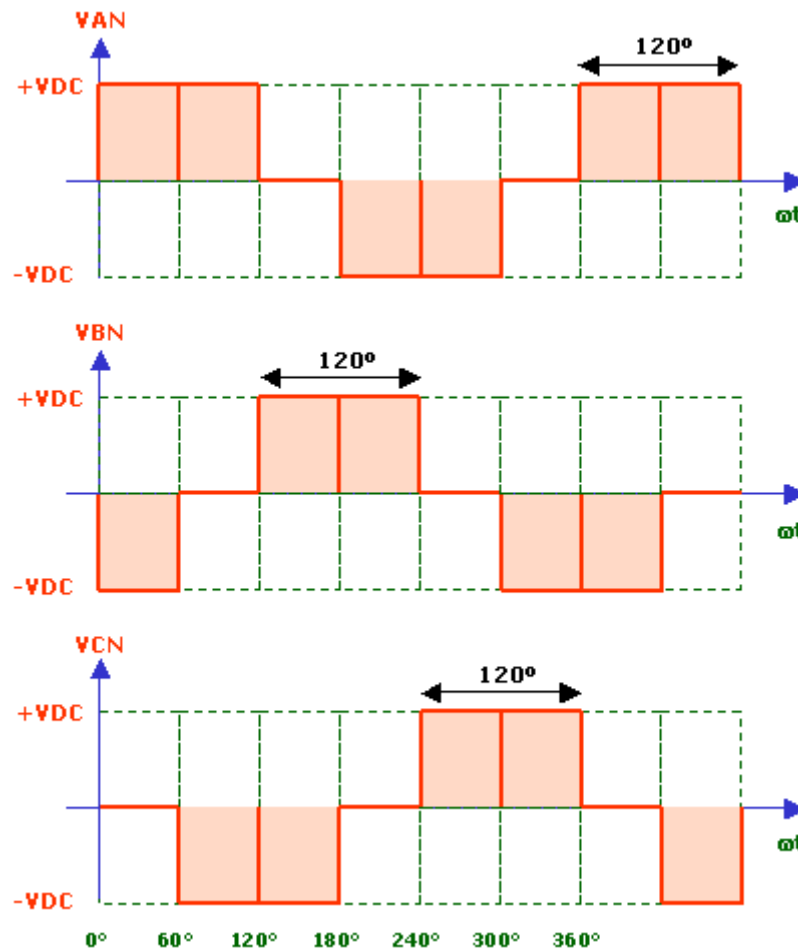


Nesta situação, somente dois transistores poderão ser ativados por vez, sendo um do grupo positivo (T1, T3 e T5) e um do grupo negativo (T4, T6 e T2).

Como este arranjo temos 6 combinações possíveis que são: VAB, VAC e VBC que conduziriam do potencial positivo para negativo, e VBA, VCA e VCB que conduziriam do potencial negativo para o positivo. Veja a seqüência:

Intervalo	IGBT1	IGBT2	IGBT3	IGBT4	IGBT5	IGBT6	VAN	VBN	VCN
0 – 60°	1	0	0	0	0	1	+VDC/2	-VDC/2	0
60 – 120°	1	1	0	0	0	0	+VDC/2	0	-VDC/2
120° - 180°	0	1	1	0	0	0	0	+VDC/2	-VDC/2
180° - 240°	0	0	1	1	0	0	-VDC/2	+VDC/2	0
240° - 300°	0	0	0	1	1	0	-VDC/2	0	+VDC/2
300° - 360°	0	0	0	0	1	1	0	-VDC/2	+VDC/2

Esta alternância entre as fases da carga recria um sinal alternado com defasagem de  $120^\circ$ , como pode ser observado no diagrama de tempo abaixo.



### O controle da velocidade

A velocidade dos motores de indução, depende basicamente da frequência aplicada e como a frequência da rede no Brasil é padronizada ou fixa em 60 Hz, teoricamente a velocidade destes motores também seria fixa. Vejamos:

$$\text{Velocidade (RPM)} = (120 \cdot \text{Frequência}) \div \text{número de pólos do motor}$$

Exemplo:

Um motor de 4 pólos, ligado diretamente à rede 60Hz, terá a velocidade nominal de:

$$\text{Velocidade (RPM)} = (120 \cdot \text{Frequência}) \div \text{número de pólos do motor}$$

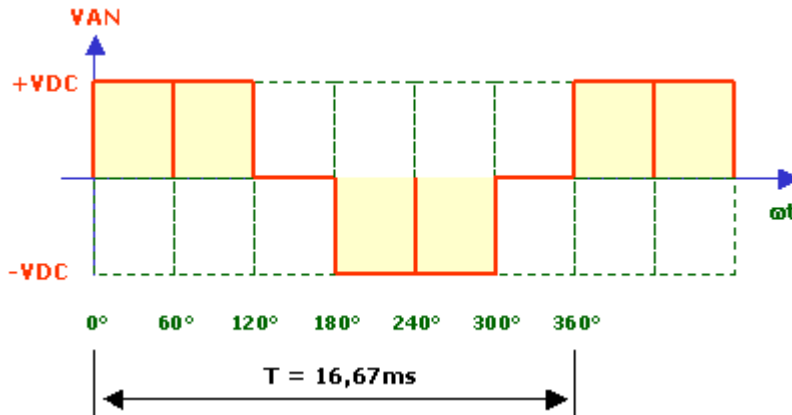
$$\text{Velocidade (RPM)} = (120 \cdot 60) \div 4$$

$$\text{Velocidade (RPM)} = 1800 \text{RPM}$$



### Modulando a frequência

A velocidade de chaveamento dos transistores permite modular a frequência, ou seja, se o chaveamento for rápido, o tempo para completar um ciclo será menor, o que aumenta a frequência, se o chaveamento for mais lento, o tempo para ciclo será maior, o que reduz a frequência.



Exemplo:

Se o tempo para completar 1 ciclo for de 16,67ms a frequência entregue será:

$$F = 1 \div T$$

$$F = 1 \div 16,67\text{ms}$$

$$F = 60\text{Hz}$$

Se o tempo for reduzido para 8,33ms a frequência passará para 120Hz.

Logo, se um motor de 4 pólos, estiver ligado a um inversor e este à rede 60Hz, podemos mudar a frequência, por exemplo, para 120Hz. Vejamos a nova velocidade.

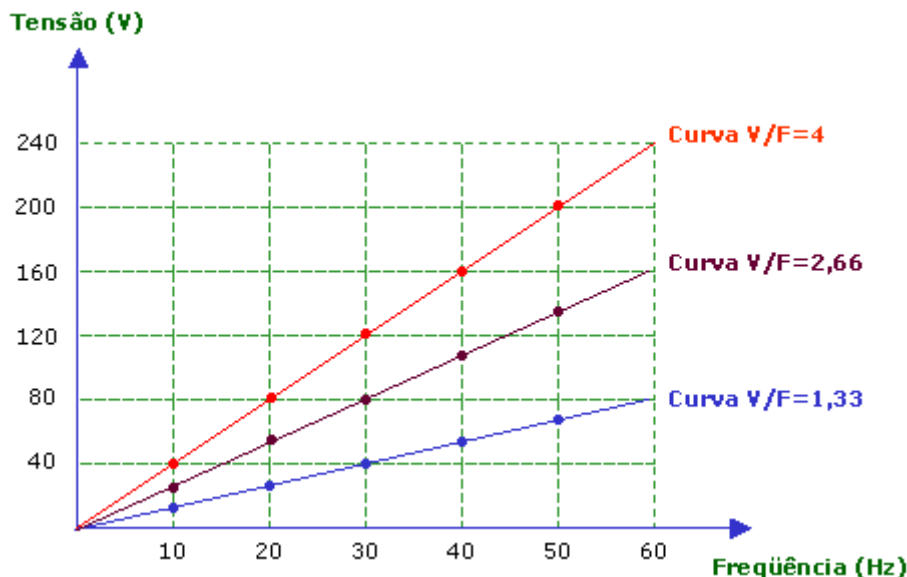
$$\text{Velocidade (RPM)} = (120 \cdot 120) \div 4 \therefore \text{Velocidade (RPM)} = 3600\text{RPM}$$

Nota: Tipicamente, os inversores operam com frequências desde 0 a 400Hz, obviamente que para aumentarmos a frequência, por exemplo, para 400Hz o motor deverá estar preparado para isso, caso contrário, sua vida útil será reduzida drasticamente.

### O controle do torque

A principal função dos inversores de frequência é controlar a velocidade dos motores, porém mantendo o torque nominal do motor. Uma das maneiras de manter o torque nominal do motor é mantendo a proporção tensão-frequência para altas e baixas velocidades.

### Curva tensão frequência (V/F)



Por exemplo, se um motor é projetado para operar em 240V a 60 Hz, a tensão aplicada deve ser reduzida para 120V quando a frequência é reduzida para 30 hertz. Se a frequência for reduzida para 20Hz a tensão cairá para 80V. Assim, o razão de Tensão (V) por frequência (Hz) se manterá constante, e mantendo esta razão constante, o torque no motor será constante.

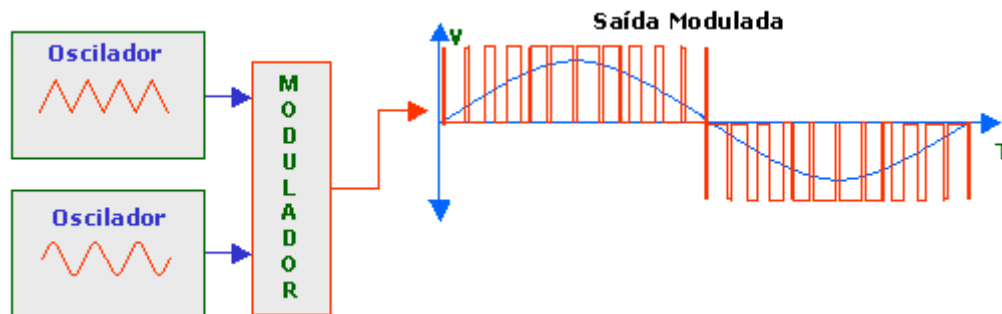
Quanto maior a razão V/F mais alto será o torque, este valor é uma parametrização que o usuário deverá fornecer ao inversor, por exemplo:

Se desejarmos um alto torque, em baixa velocidade, a razão V÷F deverá ser a maior que o equipamento fornecer ou se a necessidade for alta velocidade com pouco torque a razão V÷F deverá ser menor.

**Nota:** Inversores de frequência com controle escalar, obedecem a curva V/F parametrizada, já inversores com controle vetorial interfere na curva V/F e podem aumentar ou reduzir a razão VF de acordo com a necessidade do sistema.

### Modulação por largura de pulso (PWM)

Para controle da tensão e frequência dos motores AC, há necessidade de um tradicional conversor DC – AC, e para que o sinal seja o mais próximo possível de um sinal senoidal, utilizamos uma técnica bastante difundida nos meios industriais, o PWM ou modulação por largura de pulso, que consiste na comparação de dois sinais de tensão, um de baixa frequência (**referência**) e o outro de alta frequência (**portadora**), resultando em um sinal alternado com frequência e largura de pulso variável.



### Sinal de Referência

Para se obter um sinal na saída do acionamento de forma desejada, é necessário compará-lo com um sinal de tensão, chamado de referência, que seja a imagem da tensão de saída desejada. Nos conversores DC – AC, a referência é senoidal.

### Sinal de portadora

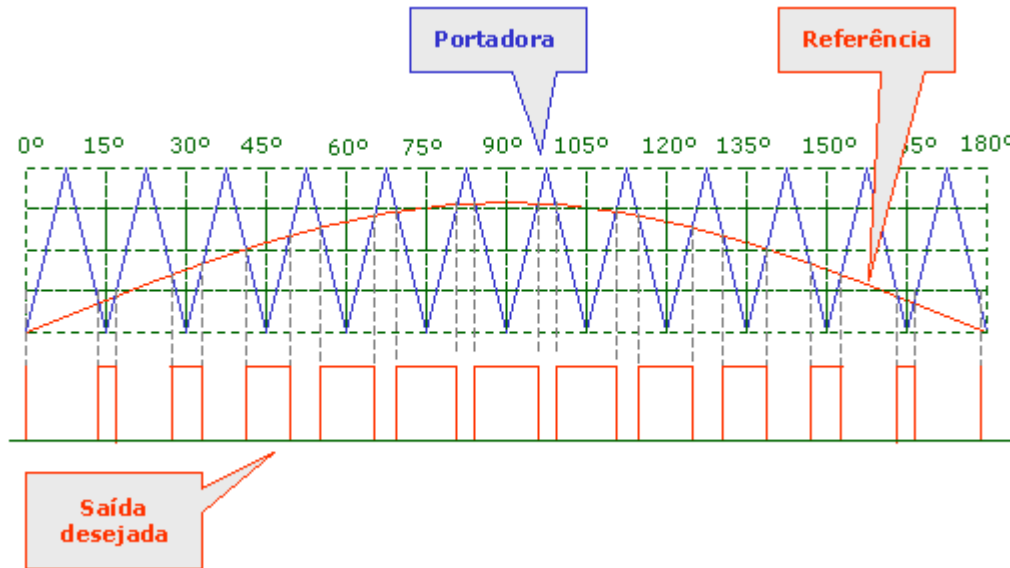
É um sinal, normalmente, triangular de frequência, superior à frequência da referência, na prática, é necessário pelo menos 10 vezes para que se tenha uma boa reprodução do sinal na saída do conversor.

### Comparador (Modulador)

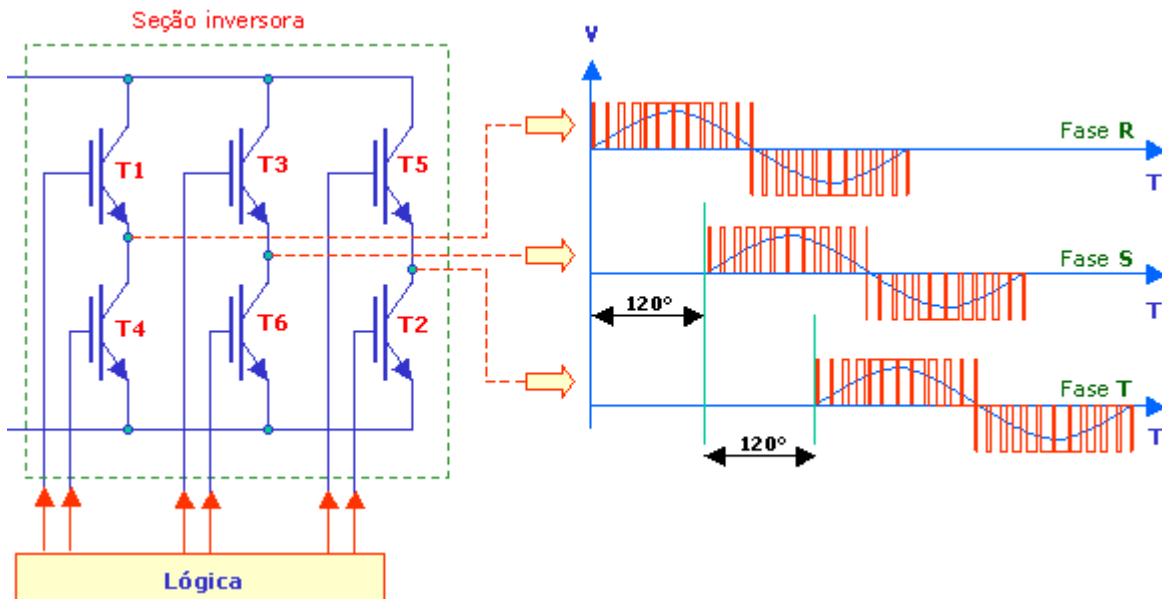
É o circuito responsável em comparar o sinal de referência com o sinal da portadora. A largura do pulso na saída do modulador varia de acordo com a amplitude do sinal de referência

### Sinal de saída

A saída é modulada de acordo com o sinal de referência, note que quanto mais a referência se aproxima do pico, mais largo fica o pulso e quanto mais se afasta mais estreito fica. Porém, em qualquer momento a frequência muda.



Agora, se alterarmos a frequência da referência, alteramos a frequência da saída modulada, lembrando que nesta etapa, também ocorrerá a inversão de fase.



### Tipos de inversores

Existem no mercado dois tipos de inversores de frequência o escalar e o vetorial, a estrutura física é basicamente igual, a diferença esta na maneira em que o torque é controlado.

**Inversor escalar** ⇒ A base do controle do torque é a relação tensão frequência, como visto anteriormente.

**Inversor vetorial** ⇒ Mais complexo e mais caro que o escalar, o inversor vetorial não obedece a relação tensão corrente fixada pelo operador, nele há um algoritmo incorporado ao software de controle que interfere automaticamente na razão V÷F, a fim de compensar necessidades de torque que fatalmente ocorrerão em rotações baixas ou elevadas.

Em alguns inversores vetoriais, há necessidade de adicionar um sensor, normalmente um encoder, que fará a leitura da velocidade e enviará ao inversor que comparará com um parâmetro, fazendo o mesmo interferir ou não na relação V/F, ou seja, aumentar a tensão sem aumentar a frequência ou aumentar a frequência sem aumentar a tensão. Este processo é conhecido como malha fechada, que tem como objetivo manter as necessidades de torque do motor. Alguns inversores vetoriais possuem sensores incorporados não sendo necessários sensores externos.

**Nota:** O inversor vetorial é indicado para torque elevado com baixa rotação, controle preciso de velocidade e torque regulável. Já o escalar é indicado para partidas suaves, operação acima da velocidade nominal do motor e operação com constantes reversões.

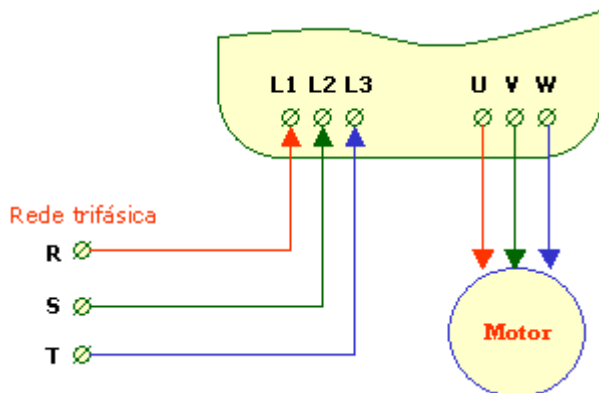
### Dimensionando um inversor de frequência

Para dimensionar um inversor devemos conhecer a carga (potência) que ele acionará e calcular a corrente que será drenada do inversor, por exemplo: Deseja-se dimensionar um inversor para um motor de 5,0 CV / 380V.

$$I = P \div (V \times \text{FP do inversor}) \rightarrow I = 5.736W \div (380V \times 0,8) \rightarrow I = 12,1 \text{ A}$$

Assim, devemos escolher um inversor com tensão nominal de 380V e corrente nominal superior a 12,1A.

O tipo do inversor depende da carga, por exemplo que a necessidade for extrema precisão de torque, que é o caso de elevadores e pontes rolantes deve ser um vetorial, caso contrário um escalar é o suficiente.



### Cuidados básicos ao instalar o inversor

- ❑ Nenhum inversor suportará uma ligação invertida. Queima no ato....
- ❑ Cabos de comunicação, não deverão estar juntos com os cabos de comunicação.
- ❑ O inversor não deve ficar confinado, deve haver ventilação / exaustão do mesmo.
- ❑ Cabos de controle devem ser blindados.

[www.clubedaeletronica.com.br](http://www.clubedaeletronica.com.br)

"Ter problemas na vida é inevitável, ser derrotado por eles é opcional." (Roger Crawford).

### Referências:

- ❑ Eletrônica de potência – Ashfaq Ahmed
- ❑ Revista :MECATRÔNICA ATUAL Nº 2 - FEVEREIRO/2002
- ❑ <http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/186>
- ❑ [http://en.wikipedia.org/wiki/Variable-frequency\\_drive](http://en.wikipedia.org/wiki/Variable-frequency_drive)